

特集号  
招待論文

# 省電力センサネットワークの開発・導入と社会への展開

—福島県の屋外フィールドにおける実証実験を通して—

鈴木 孝明<sup>†1</sup> 野田 潤<sup>†1</sup> 久保 祐樹<sup>†2</sup> 八百 健嗣<sup>†2</sup> 楫 勇一<sup>†3</sup>

<sup>†1</sup> 日本電気 (株) <sup>†2</sup> 沖電気工業 (株) <sup>†3</sup> 奈良先端科学技術大学院大学

実世界に設置したセンサノードから、多種多様なセンサデータを収集し活用するクラウドサービスが期待されている。このようなクラウドサービスの普及には、クラウドにセンサデータを届けるセンサネットワークの高信頼化および高安全化と省電力化が不可欠である。本論文では、センサネットワークを高信頼および高安全に運用可能にしつつも省電力化を図る省電力センサネットワーク技術を提案する。提案技術の省電力効果を計算機シミュレーションで評価するとともに、福島県の高等学校に構築した、合計約 60 台のセンサノードからなるセンサネットワークを用いた実証実験について紹介する。

## 1. はじめに

実世界に設置したセンサノードから、多種多様なセンサデータを収集し活用するクラウドサービスが期待されている (図1)。たとえば、HEMS (Home Energy Management System), BEMS (Building Energy Management System) などの建物内の電力使用状況を可視化するシステム [1] や、農地の温湿度や土壌成分などを観測するシステム [2] は、社会活動や企業活動などの効率化、付加価値化を実現する。これらのサービスは、クラウドと、センサデータを収集するセンサネットワークにより実現

される。

センサデータを用いたクラウドサービスの普及には、センサネットワークの高信頼化および高安全化が必要な上、さらに省電力化が不可欠である。特に、野外や屋外に設置されることが多いセンサネットワークには、効率的なデータ送信とノード管理による安定的運用によりシステムの信頼性を高める必要があり、また、センサデータの盗聴やノード盗難への対策による高い安全性の確保が必要である。また、一般的にバッテリー駆動のセンサノードを用いるセンサネットワークでは、ノードの消費電力を抑制し、ネットワークの長期運用を実現する必要もある。

本論文では、高信頼化および高安全化を実現しつつも省電力化を図る省電力センサネットワーク技術を提案し、提案技術の開発および性能評価と実際のセンサネットワークを用いた実証実験について述べる。実センサネットワークを用いた実証実験においては、福島県の高等学校に合計約 60 台のセンサノードによるセンサネットワークを構築し、提案技術の実用性を検証した。

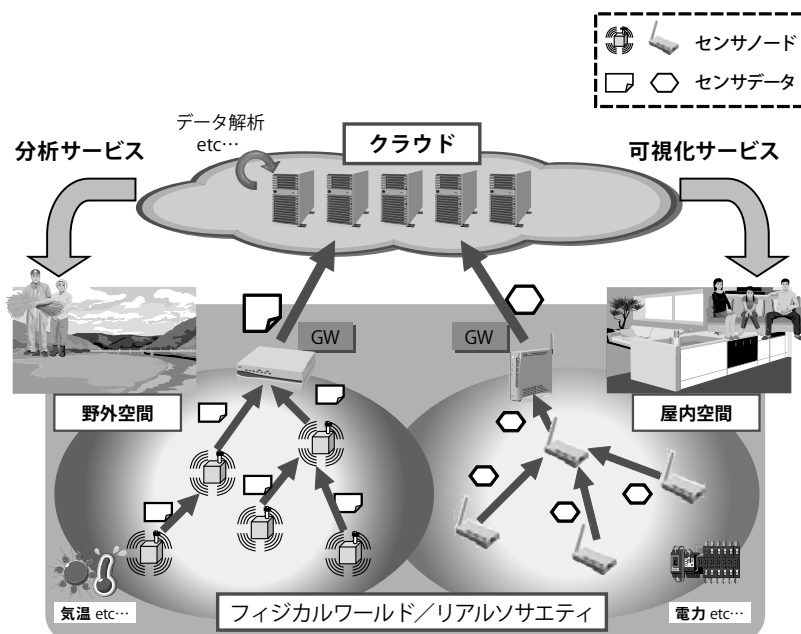


図1 センサデータを用いたクラウドサービス

## 2. センサネットワークの省電力化の必要性

センサネットワークの長期運用の重要性から、従来からネットワークの省電力化が議論されており、さまざまな研究開発が行われてきている[3],[4]。ソフトウェア技術によるセンサネットワークの省電力化は、主に無線通信モジュールのスリープ期間（間欠周期）の最適化と、通信トラフィックの低減により実現する。トラフィックの低減に伴い、各ノードの無線通信の期間が短くなるため、各ノードはスリープ制御に基づき、通信しない期間を消費電力抑制モード（スリープモード）に切り替えることができる。

従来の高信頼化および高安全化の技術はセンサネットワークの消費電力が増大する可能性があるため、高信頼および高安全、かつ省電力な技術が必要となる。MAC層の従来技術においては、省電力MAC方式としてX-MAC (A Short Preamble MAC Protocol for Duty-cycled Wireless Sensor Networks)[12]がある。この方式では、トラフィックの量と間欠周期の関係が適切でないと消費電力が増加したり、輻輳によるパケットロスが発生したりする課題がある。また、ブロードキャスト送信にかかるコストが無線帯域と消費電力の両方の観点で高いため、輻輳やネットワーク寿命を縮める原因となるという問題を抱えている。APL層の従来技術においては、以下のような課題がある。センサネットワークの管理方式として、SNMP (Simple Network Management Protocol)を用いた拡張方式[8],[9]がある。これらの方式は、センサネットワーク向けの効率的な管理方法を提案しているが、ネットワーク全体を定期的に管理する場合には、管理通信トラフィックによる消費電力増加を引き起こす可能性がある。また、センサデータをクラウド上のサーバに安全に配送するためには、センサノードとサーバ間でセキュアな通信路を確立する必要がある。しかし、インターネット上のサーバと親和性の高いプロトコル[14]は、センサネットワーク上では通信トラフィックが多く、ネットワークの輻輳を生じさせる問題がある。さらに、センサネットワークを安全に運用するためには、ネットワークにおけるグループを安全に管理するためのグループ鍵管理が重要である。センサネットワークでは1台のノードが、複数のグループに同時に所属する可能性があるが、従来のグループ鍵管理方式[5],[6]を複数独立して導入する場合、鍵管理のための通信負荷が所属するグループ数に応じて増加する問題がある。

## 3. 省電力センサネットワークの開発と性能評価

センサネットワークを高信頼および高安全に、かつ省電力に運用するための省電力システムを策定し、システムの中核となる4つの省電力センサネットワーク技術について、開発および性能評価した。省電力システムでは、図2に示すように、MAC層、およびAPL層に以下の提案技術を配置する。

### MAC層技術

- 間欠動作による省電力化技術

### APL層技術

- 自律型省電力管理通信技術
- セキュアセッション確立代行技術
- 省電力暗号鍵更新技術

各技術の性能を、計算機シミュレーションにより評価した。性能評価にあたっては、図2のAPL層に位置する3つの技術が、それぞれ間欠動作による省電力化技術をMAC層に採用し、連携して評価した。

以降、4つの提案技術の開発および性能評価について述べる。

### 3.1 間欠動作による省電力化技術

文献[12]のような周期的に受信待機を行う省電力方式では、パケット送信時には連続して制御パケットを送信して、スリープしている宛先ノードを起こすためのパケット送信を行う必要がある。この制御パケット送信を削減するために、IEEE802.15.4eのCSL (Coordinated Sampled Listening) では、ユニキャスト送信時にはノード間でローカルに交換する同期情報を利用して、制御パケット送信数を削減する方法が規定されている。しかし、ブロードキャスト送信時にはこの方法は適用できないという課題があった。ブロードキャスト送信時に制御パケットを何度も送信することは消費電力の問題だけでなく、

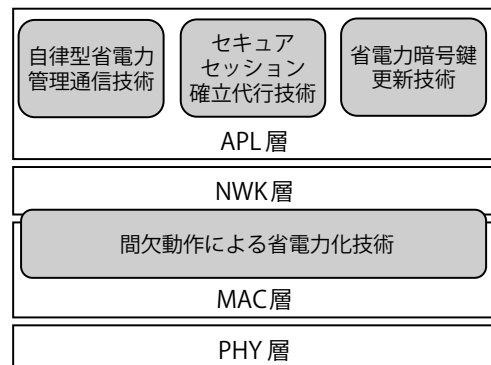


図2 省電力システムの構成概要

輻射によるパケットロスを起こしやすいという問題がある。

こうした課題を解決するため、ノード間が自律的に間欠受信タイミングを調整することで、ブロードキャスト時の送信オーバーヘッドを削減する方式を開発した。開発したブロードキャスト最適化の方式の動作を図3に示す。図3の横軸は時間であり、各ノードのアクティブ状態 (High) とスリープ状態 (Low) の時間変化を示している。ノード1がブロードキャスト送信ノードであり、それ以外が受信ノードである。正しく通信するためには、送信ノード、受信ノードのアクティブ状態が重なる必要がある。従来方式では各ノードが間欠受信を行うタイミングに関して特別な制御を行わないため、そのタイミングはランダムとなる。そのため、ブロードキャスト送信時は間欠周期期間だけアクティブ状態となって制御パケットを送信する必要がある (図3上段)。これに対して提案方式は、各ノードが間欠受信を行うタイミングを文献[13]の方法で同期させている。そのため、近隣のノードの間欠受信のタイミングが近くなり、ノード1がアク

ティブ状態になってブロードキャスト送信を行う時間を短くすることが可能になる (図3下段)。

提案方式の評価としてゲートウェイ (GW) 1台、中継無線ノード20台の構成でセンサネットワークを構築し実験した。トラフィックは基地局から全ノード宛のフラッディング送信とし、その送信間隔を60秒と120秒と比較した。この時の従来方式との消費電力の比較結果を図4に示す。提案方式を用いることで60秒間隔のデータ送信時には消費電力を従来方式に対して69%削減、120秒間隔の送信時には消費電力を従来方式に対して60%削減することを確認した。この時パケットの到達率はどの場合でも100%であり、提案方式では信頼性を低下させることなく、消費電力を削減できていることが分かる。

### 3.2 自律型省電力管理通信技術

提案する自律型省電力管理通信技術は、ゲートウェイが管理情報の要求を一斉配信し、各センサノードがゲートウェイの指示する応答ポリシーに従い、必要に応じて管理情報の応答を行うことで、管理通信トラフィックを低減し、省電力化を図る。応答ポリシーは、ゲートウェイにおいて、過去の各センサノードの管理情報などから、自律的かつセンサノードごとに適応的に決定され、管理情報の要求に含めて各センサノードへ指示される。自律型省電力管理通信技術による通信概要を図5に示す。

図5では、ゲートウェイからのブロードキャストによる管理情報の要求に対して、センサノード1, 2, 6, 8が管理情報を応答し、3, 4, 5, 7, 9は応答ポリシーに基づき管理情報を応答しない。応答ポリシーとしては、たとえば、“2回の要求に対して1回だけ応答せよ”などがある。すなわち、図5の例では、センサノ

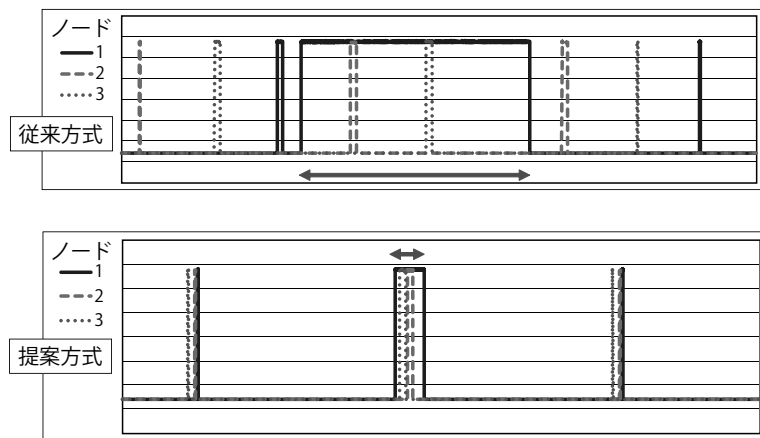


図3 ブロードキャスト送信の省電力化

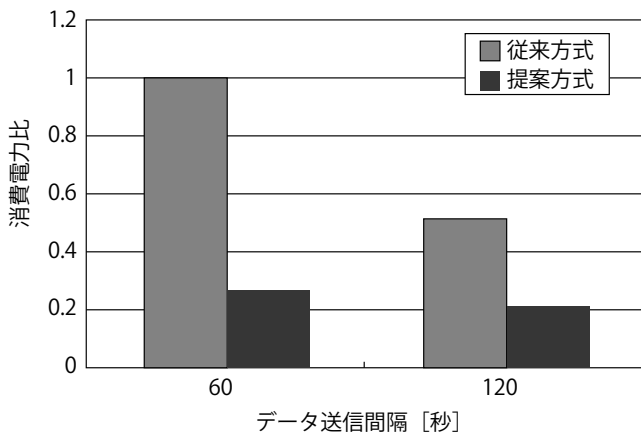


図4 提案方式の省電力効果

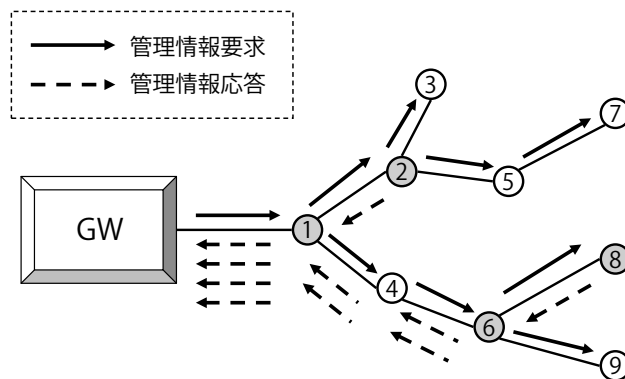


図5 自律型省電力管理通信技術による通信概要

ド3, 4, 5, 7, 9は、定期的な要求に対して1/2の割合で応答すればよいために、今回応答しない。また、ゲートウェイは、応答しなかったセンサノードの管理情報の不足を補うために、同センサノードの過去の管理情報などから、現在の管理情報値を推定して補足する。なお、どのセンサノードにどのような応答ポリシーを割り当てるかは、過去のセンサノードの管理情報の精度などから、ゲートウェイが自律的に決定する。

ZigBeeデバイスを用いて提案方式を実機実装した。ZigBeeはZigBee Alliance[10]で規定されている近距離無線通信規格であり、無線センサネットワークの通信技術として活用されている。ZigBeeスタックでは、PHY層およびMAC層にIEEE802.15.4を採用し、NWK層以上を独自に規定している。提案方式の機能は、ZigBeeスタック上のAPL層にアプリケーションとして実装した。また、ゲートウェイ内における提案方式の機能（管理情報の要求および応答の処理等）は、OSGiバンドルとして実装した。OSGiバンドルは、OSGi Alliance[11]が規定するOSGiフレームワーク上でプラグインが容易なJavaモジュールである。

約1,000台規模のセンサネットワークにおいて提案方式をシミュレーション評価したところ、従来方式に対して、最大で約80%の省電力効果を示した。評価結果を図6に示す。なお、図6のARCEM\_LT\_x-yは、リンク品質の管理情報を自律的に管理する際の提案方式であり、xおよびyが大きいほど、応答メッセージを抑制する。

図6より、管理通信による消費電力が、従来方式CMに対してARCEM\_LT\_8-8が約20%を示すことが分かる。すなわち、約80%の省電力化を実現した。

### 3.3 セキュアセッション確立代行技術

本技術の目的は、センサネットワークの通信トラフィ

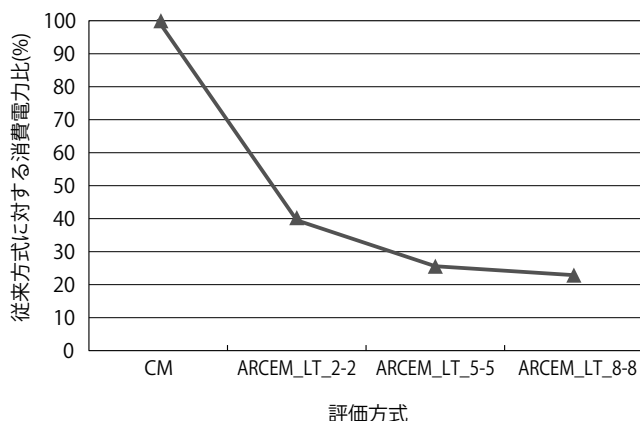


図6 従来方式に対する提案方式の省電力効果

ックを抑制しつつ、センサノードとクラウド上のサーバとの間に安全性の高いエンド・エンドパスを確立することである。センサノードが、インターネット上のサーバと安全性の高いエンド・エンドパスを確立するためには、既存のインターネットと親和性の高いTLS[14]等のプロトコルをサポートする必要がある。しかし、TLSで発生する通信トラフィックは、センサネットワークにとって負荷が大きく、省電力動作の阻害要因となる。

提案方式では、センサノードが、インターネット上のサーバと実施するセキュアセッション確立処理を、センサネットワーク外部の通信管理サーバに代行させることによって、センサネットワークを流れる通信トラフィックを削減する。本提案方式の概要を図7に示す。本提案方式では、まず通信管理サーバがセキュアセッション確立要求を受信する(①)。セキュアセッション確立要求を受信した通信管理サーバは、センサノードに代行してサーバとセキュアセッションを確立し(②)、鍵等のセキュリティパラメータを含んだセッション確立結果をセンサノードに通知する(③)。センサノードは、通信管理サーバよりセッション確立結果を引き継ぐことによって、サーバとの間のエンド・エンドの暗号通信路を通常よりも少ない通信トラフィックで構築する(④)。提案方式の省電力効果を確認するため、約1,000台規模のマルチホップネットワーク上でTLSの通常処理時と提案代行処理時それぞれのトラフィックを模擬したパターンを発生させ、平均Duty比の削減効果を評価した。評価結果を図8に示す。間欠動作による省電力化技術で開発した間欠動作周期最適化機能を2段階/3段階に切り替えて動かすことにより、TLSの通常処理時と比較して、それぞれ約50%/75%の省電力効果を確認した。

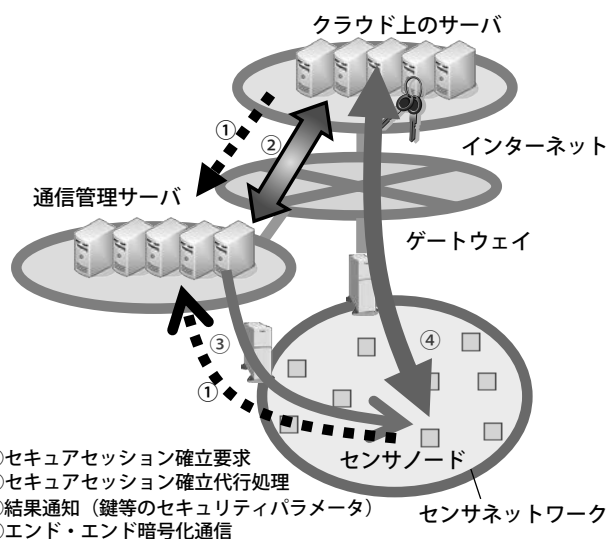


図7 セキュアセッション確立代行方式

### 3.4 省電力暗号鍵更新技術

大規模なセンサネットワーク上で安全なアプリケーションを構築・運用するためには、センサネットワークにおけるグループを安全に管理するためのグループ鍵管理が重要である。グループのメンバだけが知り得る「グループ鍵」を導入し、各種の暗号技術を使うことで上記の安全性を確保することが可能となるが、グループ鍵については、グループの実態に即した形でこれを管理する必要がある。特に大規模なセンサネットワークにおけるグループ鍵管理では、以下に述べる2つの点を十分に考慮する必要がある。

1点目は、グループ化されたノードは、時間の経過に応じて変化する可能性がある点である。現実のセンサネットワークの応用では、新しいノードを参加させて既存のグループに追加したり、故障、紛失、あるいは盗難等の理由で、既存のノードがグループから離脱する事態も起こり得る。グループから離脱するノードが発生した場合でも安全性を継続して確保するためには、離脱ノードの保有する鍵情報が悪用されないよう対策する必要があるが、ノードの紛失・盗難等の理由で離脱ノードの制御が不可能となる事態を想定すると、速やかにグループ鍵を更新し、離脱ノード以外のグループメンバに新しいグループ鍵を再配送すること（ノード無効化）が事実上唯一の解決法となる。グループに所属するメンバ数が少ない場合、離脱ノード以外に対してユニキャスト的に新しいグループ鍵を配送する方式[5]も適用可能であるが、中・大規模グループにおいてユニキャスト的な鍵配送を行うことは、効率面から問題がある。大規模グループにおいて効率的にグループ鍵を更新する方式は、情報セキュリティの分野で多く研究されており、たとえば鍵管理情報を木構造に基づいて定義する方式[6]がよく知られている。

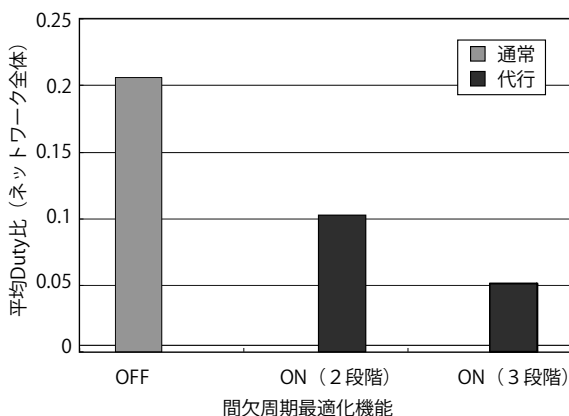


図8 TLS 通常処理に対する提案代行方式の省電力効果

注意すべき2点目は、1台のノードが、複数のグループに同時に所属する可能性がある点である。これに対する安直な解決法は、上述したようなグループ鍵管理方式を複数独立して導入することであるが、この安直な方式では、鍵記憶のためのメモリ量や鍵管理の通信負荷が、所属するグループ数に応じて増加してしまう。これは、資源が非常に限定されたノードでは、致命的な問題となることも考えられる。

本研究開発では、上記2つの観点に十分留意して、大規模センサネットワークにおけるグループ鍵管理方式を提案し開発した[7]。開発方式は、無線センサネットワークにおいて実用的な「多数のノードからなる複数のグループ」におけるグループ鍵を効率的に更新管理する。具体的には、互いに異なる属性共有集合の族を複数利用することにより、鍵配送にかかわる通信を多重化し、再送を含む通信量の削減に貢献する。

約1,000台規模のセンサネットワークにおいて、64グループの鍵更新にかかる通信量を計算機シミュレーションにより評価したところ、通信量が最少となる多重度のとき、鍵更新にかかる通信量を従来方式と比べて約12%以下に抑制した。暗号化データの送受信において、ノード上で対称鍵暗号のような軽量の演算のみを実施する場合、無線センサネットワークにおける消費電力の9割強が通信に起因するものと見なせる。これを鑑みて算出した消費電力削減効果を図9に示す。従来方式に対して消費電力を50%以上削減することを確認した。さらに、実センサネットワークに提案方式を導入し、実機上での鍵情報の更新管理を実現できることを確認した。

## 4. 省電力センサネットワークの社会への展開

東北地区の震災復興への貢献を目的としたクラウドサ

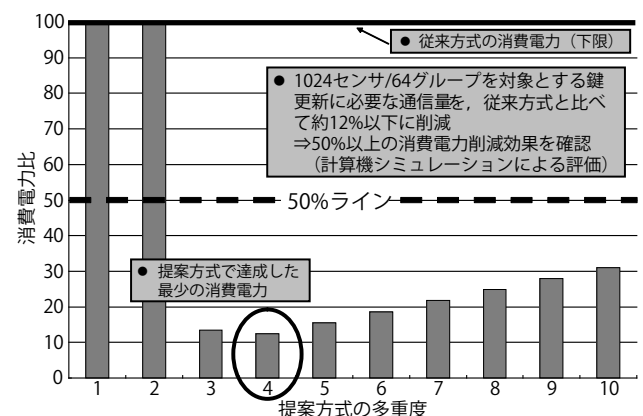


図9 省電力暗号鍵更新技術にて達成した消費電力削減効果

ービスとして、気温、湿度、照度、放射線量のセンサデータを収集するセンサネットワークを福島県の高等学校に構築し、開発した省電力センサネットワーク技術の実用性を検証した。

#### 4.1 実証実験の背景と概要

東日本大震災の福島原発事故の影響による計画的避難区域を近隣に持つ福島県内の地域では、気候により変化する放射線量の定常的な測定の要望がある。すぐさま避難する必要のない地域であっても、住民には、雨や風などの影響により放射線量が高まることへの不安が常にあるためである。

我々は、気候情報を表す気温、湿度、照度、および放射線量を測定し、クラウドを介して情報公開するセンサネットワークシステムを、近隣山間部の一部に計画的避難区域を持つ地域の高等学校に構築した。本高等学校には、校庭の放射線量を網羅的かつ定常的に観測することで、生徒および保護者の安心・安全につなげたい狙いがある。構築したシステムでは、校庭内に設置した約60台のセンサノードが観測したセンサデータを、PCやスマートフォンにより確認できる。なお、近年の一般的なセンサネットワークの実証実験は多くても数十台規模で構築されるため[15],[16],[17]、60台のセンサノードを用いた本実証実験は、比較的大規模な実験である。また、校庭内において測定が必要な地点は60台で十分に網羅できた。

構築したセンサネットワーク上で、開発した4つの技術の実用性を検証した。実用性は、構築した実センサネットワーク上での提案技術の正常動作により確認した。また、ユーザ（高校関係者）へのシステム全体に関するヒアリングも行った。

#### 4.2 実証実験システム

実証実験システムは、各提案技術を実装した約20台から構成される3つのセンサネットワークが、クラウド上で共通にセンサデータを収集するデータ収集サーバにセンサデータを集約する構成とした。図10にシステム概要を示す。

各センサノードは、自身のネットワークのゲートウェイにセンサデータを送信する。3つのゲートウェイは、収集したデータを、3G網を介してデータ収集サーバに集約する。ユーザは、PCやスマ

ートフォンのWebブラウザによるインターネットアクセスで、データ収集サーバが公開するセンサデータを閲覧できる。なお、放射線センサは、全センサノードで共通の組込みモジュール Pocket Geiger Embedded Type V を用いた。

各々のセンサネットワーク上で、各提案技術の実用性を検証した。センサネットワークは、図10に示すように、自律型省電力管理通信技術、セキュアセッション確立代行技術、省電力暗号鍵更新技術の提案技術により3つに分割した。3分割したのは、各提案技術の実用性検証を基礎的にかつ正確に行うためである。

#### 4.3 実証実験の結果

校庭内のセンサデータを定常的に収集し、PCやスマートフォンによりサーバに蓄積されたセンサデータを閲覧できること、および各提案技術が正常動作することを確認した。また、高校関係者よりシステムへの意見を伺うことができた。

データ収集サーバは、20分間隔で各センサノードのセンサデータを収集および公開した。収集間隔はシステム上で設定可能であるが、用いた放射線センサの計測精度より、20分間隔の収集を基本とした。図11に、校庭地図上に収集したデータを表示した結果を示す。

データ収集サーバは、地図を数グループに分割し、地図上の数個の代表点においてグループの平均値を表示する。その際、ユーザの視認性を高めるために、平均値の表示は、センサデータの値レベルにより背景色を変えて表示する。各センサノードの計測値を見る場合は、地図上に全ノードを出力した後にノードを選択して確認する。各提案技術の検証結果について以下に述べる。

自律型省電力管理通信技術が、実センサネットワーク

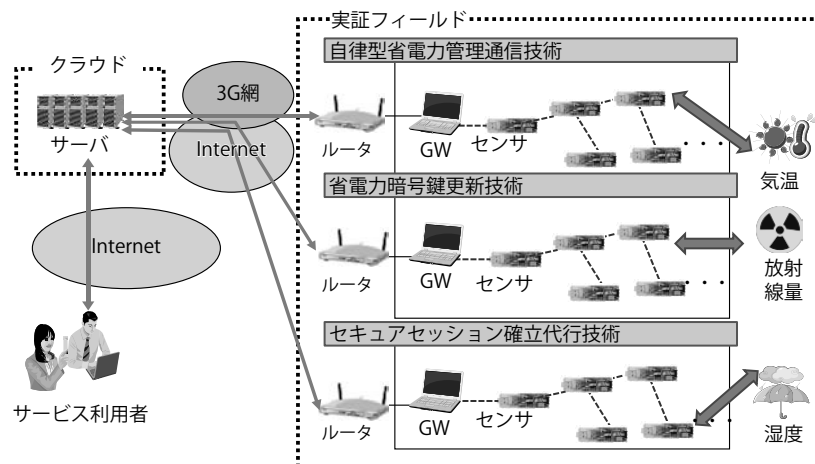


図10 実証実験システムの構成概要

を効率的に管理することを確認した。ゲートウェイが自律的に決定した応答ポリシーに従い、各センサノードが応答を抑制しながらも、ゲートウェイが不足する管理情報を推定補足することで正常にネットワークを管理した。図12に、開発したゲートウェイ上の提案技術によるネットワークトポロジ管理の様子を示す。なお、図11,12においては、画面の説明のため、破線で囲まれた部分を拡大表示したものを表示イメージとして示している。

図12より、ゲートウェイを頂点としたツリートポロジ構成を管理していることが確認できる。なお、自律型

省電力管理通信技術では、ツリートポロジの管理において、ツリーの末端ノードのみが応答するだけでネットワーク全体のトポロジを管理する機能を備える。実証実験では、本機能の正常動作も確認した。

セキュアセッション確立代行技術を用いて、センサノードとゲートウェイとの間でセキュアな通信路を確立し、センサデータを安全に収集することを実証した。実験時のネットワークトポロジおよびトラフィック量を測定した結果を図13および図14に示す。図13において、センサノード間を結ぶ細線は、マルチホップネットワークにおけるセンサノード間の接続関係を示している。一方、センサノードと左下に配置されるサーバを結ぶ太線は、センサノードがマルチホップネットワークを介してサーバとエンド・エンドの接続を確立し、センサデータをサーバに通知する様子を示している。一方、図14は、TLSの通常処理、または、代行処理を利用したために要した通信トラフィック量を示す。実機検証により、提案方式は、従来方式であるTLSの通常確立処理と比較して、最大で約21.5%のトラフィック量で、安全にセンサデータを収集することを確認した。また、図13と同じノード配置のネットワークで間欠動作による省電力化技術を用いて、省電力効果を測定したところ、到達率を悪化させることなく消費電力を60%削減できていることを確認した。

一方、センサノードと左下に配置されるサーバを結ぶ太線は、センサノードがマルチホップネットワークを介してサーバとエンド・エンドの接続を確立し、センサデータをサーバに通知する様子を示している。一方、図14は、TLSの通常処理、または、代行処理を利用したために要した通信トラフィック量を示す。実機検証により、提案方式は、従来方式であるTLSの通常確立処理と比較して、最大で約21.5%のトラフィック量で、安全にセンサデータを収集することを確認した。また、図13と同じノード配置のネットワークで間欠動作による省電力化技術を用いて、省電力効果を測定したところ、到達率を悪化させることなく消費電力を60%削減できていることを確認した。

実センサネットワークに省電力暗号鍵更新技術を導入し、各センサの鍵情報の更新管理を行った。この鍵情報は計測したデータに署名を付与するための署名鍵とし、送信元を偽る「なりすまし」やデータを偽造する「改ざん」を検知するために用いた。署名アルゴリズムには対称鍵暗号AESに基づくCBC-MAC (a Cipher Block Chaining Message Authentication Code) を採用した。各センサと鍵情報を共有するゲートウェイ

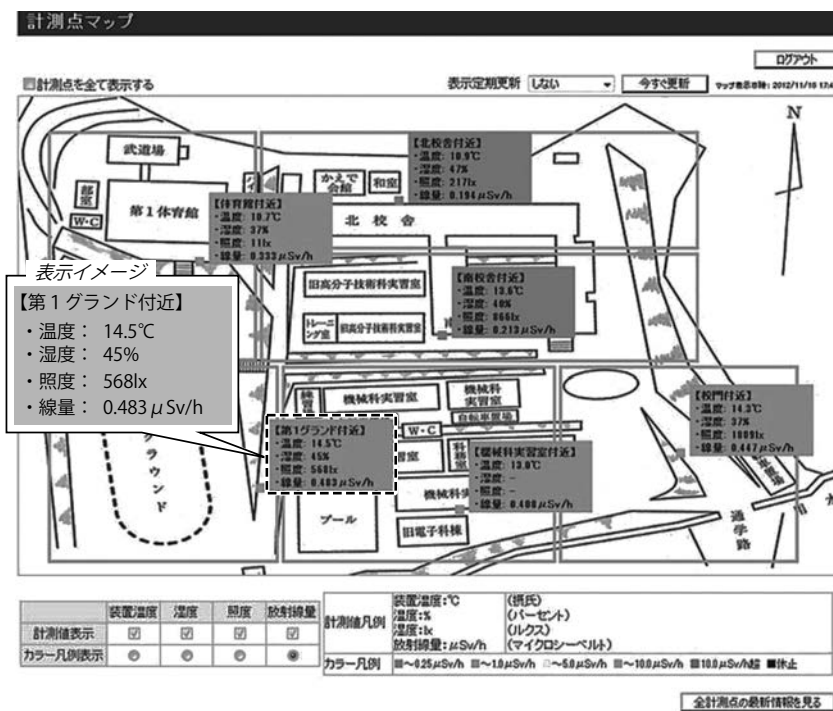


図11 校庭地図上でのセンサデータ収集結果表示画面

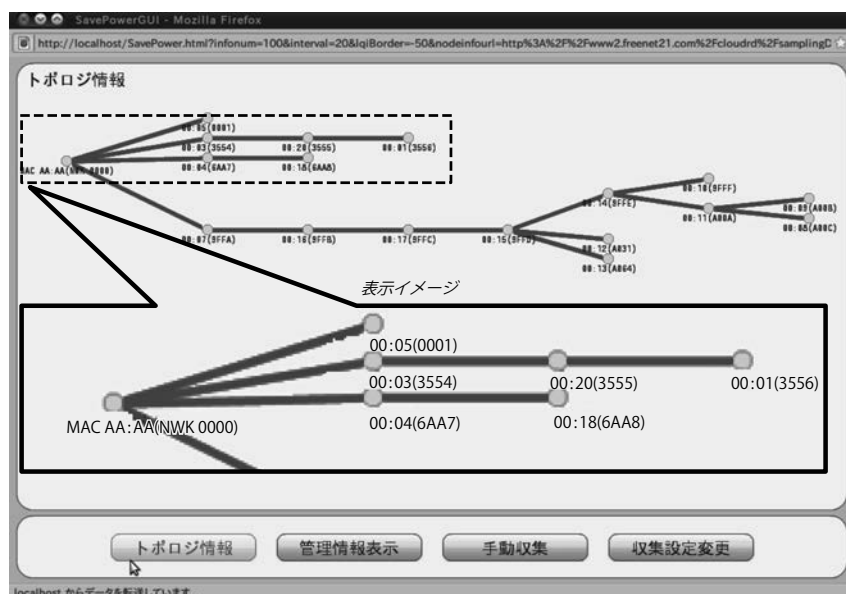


図12 ネットワークトポロジ管理画面

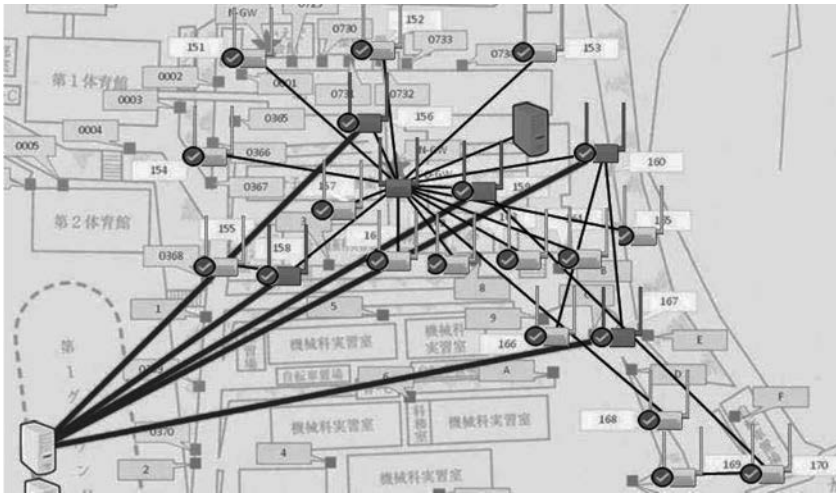


図13 構築した920MHz帯IPv6対応無線マルチホップネットワークとデータ収集の様子

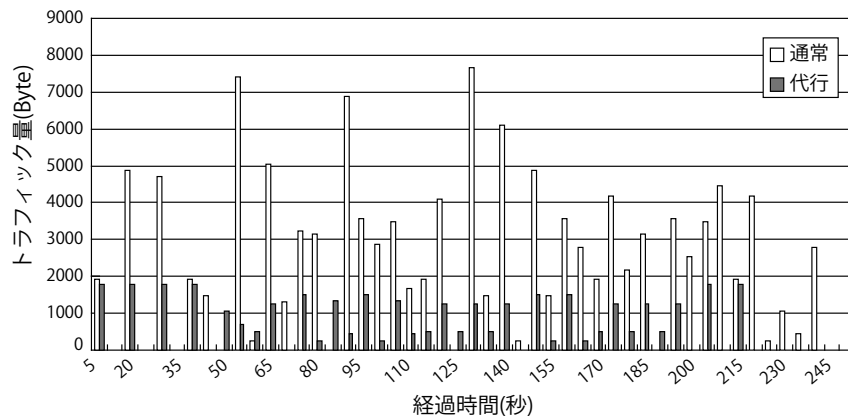


図14 トラフィック量の削減効果 (TLSを利用したセンサ値通知, 20台)

イにて、データに付随させる署名の検証を行い、検証に失敗したときこれらの行為があったものと認識する。検証に失敗するデータが到着したとき、サービス利用者の画面では図11上で当該データが無効であることを明示するような動作とした。注意すべきは、これら信頼性は署名鍵が外部に漏洩していないときのみ担保される点である。外部への漏洩を防止するためには、署名鍵を定期的に更新し、悪意のある第三者にこれを推測させないことが肝要である。この更新の間隔は運用で担保したい信頼性の程度によるが、本実験では環境情報の計測ごとに更新を実施するような動作（ワンタイム認証：最も信頼性が高い運用）を実現できることを確認した。

その他、本実験実験に関して、高校関係者より、校庭内を網羅的かつ定期的に観測可能な本システムの有効性が高いとの意見をいただくとともに、一方で、ゲートウェイの可搬性について要望をいただいた。スマートフォンにより、校庭地図画面上で観測定点の値を視覚的に確認できるため、一般ユーザも使いやすいシステムである

ことの認識をいただいた。一方で、ゲートウェイをより小型化してほしいとの要望をいただいた。小型化により、設置や持ち運びを容易に行いたい意図があると推測される。なお、本実験実験では、ゲートウェイの試作物としてノートパソコンを用いたため、比較的大型であった。

#### 4.4 実証実験からの知見

実証実験システムの構築および各検証より、センサネットワークの構築および運用に関する知見を得ることができた。

センサデータの整合、加工処理は、センサネットワーク側で調整可能であることが望ましい。今回のシステムでは、放射線量の値の校正機能をデータ収集サーバにのみ持たせ、全センサノードを共通に校正する仕組みとした。しかしながら、実際のセンサノードには多少なりの計測値の個体差がある上、固体差や校正の調整の必要性を認識できるのが現場であったことから、調整に時間を要した。センサノード

個々に柔軟な調整機能を持たせるのが困難な場合、少なくともゲートウェイにはその機能を持たせることが望ましい。

広域無線通信網を用いたクラウドへのデータ送信を行うべきである。現場の設置条件の事前把握は容易ではなく、また、ユーザのセンサノードの設置点のニーズは変化する可能性があるためである。実証実験では設置条件の事前確認ができたが、実サービスの展開においては、事前確認が容易でない場合も多く、ゲートウェイの設置が現場で決まることも推測される。特に、実証実験の高校関係者からゲートウェイの小型化の要望をいただいたように、ゲートウェイの設置の自由度は重要であると感じた。したがって、センサデータを収集しクラウドに送信するゲートウェイの柔軟な設置を実現するために、クラウドへのアクセスには広域無線通信網を用いることが望ましい。



## 5. おわりに

実世界の環境情報を収集して活用するクラウドサービスの実現に必要な、センサネットワークの高信頼および高安全な運用と省電力化を図る省電力センサネットワーク技術について、提案および開発し、計算機シミュレーションにより性能を評価した。さらに、福島県の高等学校をフィールドとした実証実験を実施し、各提案技術の効果と実用性を検証した。性能評価の結果、各提案技術は、各々の従来技術より少なくとも50%の省電力化を達成することを確認した。また、実証実験より、各提案技術の実用性を確認した。特に、実証実験からは、センサネットワークを用いたクラウドサービスにおいて、現場運用からでしか分からない注意点や検討事項を確認することができた。今後は、通信ハードウェアの高性能化に対応する提案技術の拡張を行っていく。

**謝辞** 本論文の一部は、総務省の委託研究「広域災害対応型クラウド基盤構築に向けた研究開発（省電力アクセスネットワーク制御技術）」プロジェクトのもとに実施したものである。

### 参考文献

- 1) 山本昌樹, 井上洋思, 岩崎 登: 家庭/小規模オフィスにおける省エネサポート技術, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, CD-ROM, 2-S15-4 (2011).
- 2) 高津戸史朗, 村川弘美, 大畑 毅, 佐久間徹: 農業 ICT における M2M サービスプラットフォーム活用, NEC 技報, Vol.64, No.4 (2011).
- 3) Intanagonwivat, C., Govindan, R., Estrin, D., Heidemann, J. and Silva, F.: Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.11, Issue 1, pp.2-16 (2003).
- 4) Ye, W., Heidemann, J. and Estrin, D.: An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, In Proceedings of IEEE INFCOM, Vol.3, pp.1567-1576 (2002).
- 5) IEEE 802.15 WPAN Task Group 4 (TG4), <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>
- 6) Perrig, A., Szewczyk, R., Tygar, J.D., Wen, V. and Culler, D.E.: SPINS: Security Protocols for Sensor Networks, Wireless Networks, 8, 5, pp.521-534 (2002).
- 7) Noda, J. and Kaji, Y.: Attribute-Based Group Key Management for Wireless Sensor Network -- A Cross-Layer Design Approach for Group Key Management, The Eighth International Conference on Wireless and Mobile Communications, Venice, Italy, pp.242-247 (2012).
- 8) 畠 基成, 鈴木秀和: SNMP を用いたメッシュ型無線センサネットワーク管理手法の検討, 電気関係学会大会支部連合大会論文集 (2011).
- 9) 牧村和慶, 間 博人, 斉藤裕樹, 戸辺義人, 徳田英幸: センサネットワーク管理システムの設計, 情報処理学会研究報告, Vol.4 (2003-UBI-003), pp.17-24 (2004).
- 10) ZigBee Alliance: Specifications, <http://www.zigbee.org/Specifications.aspx> (2013年5月15日現在).

- 11) OSGi Alliance, <http://www.osgi.org/Main/HomePage> (2013年5月15日現在).
- 12) Buettner, M., Yee, G.V., Anderson, E. and Han, R.: X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-cycled Wireless Sensor Networks, ACM SenSys, pp.307-320 (2006).
- 13) 久保祐樹, 柳原健太郎, 野崎正典, 福永 茂, 中井敏久: データ収集型センサネットワークに適した低遅延省電力無線マルチホップ通信, 電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J92-B, No.8, pp.1225-1235 (Aug. 2009).
- 14) Dierks, T. and Rescorla, E.: Request for Comments 5246: The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.2, IETF.
- 15) 児島史秀, 原田博司: IEEE802.15.4g/4e 準拠 SUN 無線機を用いるスマートメータネットワークの検討と実証, 信学会技報, Vol.112, No.242, pp.51-56 (2012).
- 16) Thanh dao, C., Kanazawa, T., Aida, H. and Tokuda, H.: fNode: Reducing Network Packet Transmission Overhead in Indoor Heterogeneous Wireless Sensor Networks, IEICE Technical Report, Vol.110, No.378, pp.159-164 (2011).
- 17) 川崎 勉, 岡田 啓, 間瀬憲一: オープンメッシュネットワーク・テストベッド構築, 信学会技報, Vol.109, No.382, pp.23-26 (2010).

**鈴木 孝明** (非会員) [suzuki-takaaki@bu.jp.nec.com](mailto:suzuki-takaaki@bu.jp.nec.com)

2007年静岡大学大学院情報学研究科情報学専攻修士課程了。同年 NEC 入社。2009年東北大学サイバーサイエンスセンター産学連携研究員。現在、NECクラウドシステム研究所勤務。M2M 通信, センサネットワーク, インタードメイン等における経路制御, ネットワーク管理の研究に従事。

**野田 潤** (正会員) [j-noda@cw.jp.nec.com](mailto:j-noda@cw.jp.nec.com)

1999年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。2001年同大学院修士課程修了。同年より NEC に勤務。デジタル著作権管理, P2P の研究を経て, センサネットワーク, ネットワークセキュリティを中心としたユビキタスコンピューティングの研究に従事。2011年奈良先端科学技術大学院大学博士課程修了。

**久保 祐樹** (非会員) [kubo635@oki.com](mailto:kubo635@oki.com)

2003年福井大・工・知能システム卒業。2005年同大学院修士課程了。同年, 沖電気工業 (株) 入社。2008年福井大大学院博士課程修了。センサネットワークの省電力化技術, 経路制御技術の研究開発に従事。

**八百 健嗣** (正会員) [yao282@oki.com](mailto:yao282@oki.com)

2003年神戸大学大学院自然科学研究科情報知能工学専攻修了。同年沖電気工業 (株) へ入社。近距離無線マルチホップネットワークにおける鍵管理技術, 認証技術の研究開発に従事。2008年 ZigBee RF4CE の仕様策定に貢献。2004年より ISO/IEC JTC 1 SC 27/WG 2 国内委員。

**梶 勇一** (正会員) [kaji@is.naist.jp](mailto:kaji@is.naist.jp)

1993年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業, 1996年同大学院修了。博士 (工学)。同年より奈良先端科学技術大学院に勤務。この間, 2003年カリフォルニア大デービス校客員研究員, 2004年ハワイ大マノア校客員研究員。情報理論, 情報セキュリティ基礎, オートマトン理論等に関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。

投稿受付: 2013年5月15日

採録決定: 2013年6月27日

編集担当: 大蒔和仁 (東洋大学)